



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

DEFORMACE NÁSTROJOVÝCH OCELÍ PO KALENÍ VE VAKUOVÝCH PECÍCH

DEFORMATION OF TOOL STEELS AFTER QUENCHING IN VACUUM FURNACES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Yosef Abu Khait

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Yosef Abu Khait**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Deformace nástrojových ocelí po kalení ve vakuových pecích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Shrnutí literárních poznatků z oblasti deformačních pochodů, které probíhají v nástrojových ocelí při martensitickém kalení se zaměřením na podmínky ohřevu a ochlazování ve vakuových pecích.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Kritéria rozdělení nástrojových ocelí a popis základních vlastností.
- 2) Druhy a způsoby tepelného zpracování nástrojových ocelí.
- 3) Specifika tepelného zpracování ve vakuových pecích.
- 4) Popsat doprovodné jevy, které provázejí pochody martensitického kalení se zaměřením na tepelná a strukturní pnutí.
- 5) Aplikovat získané poznatky při sledování deformačních změn u konkrétní součásti vyrobené z nástrojové oceli po kalení.

Seznam literatury:

Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu II. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 1999, (2. opravené a doplněné vydání 2002)

Fremunt, P., Krejčík, J., Podrábský, T.: Nástrojové oceli. Dům techniky Brno, Brno, 1994

Pluhař, J. a kol.: Nauka o materiálech. SNTL, Praha, 1989

Askeland, D.R., Phulé, P.P.: The Science and Engineering of Materials. Thomson-Brooks/Cool, 4th ed. 2003 (5th ed. 2005)

Callister, W.D., Jr.: Materials Science and Engineering. An Introduction. John Wiley & Sons, Inc., 6th ed., 2003

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 29. 3. 2016



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

Abstrakt

Tématem bakalářské práce jsou deformačními pochody, které probíhají v nástrojových ocelích při martenzitickém kalení se zaměřením na podmínky ohřevu a ochlazování ve vakuových pecích. Deformační změny u konkrétních součástek vyrobených z nástrojové oceli po kalení ve vakuové peci byly analyzovány v rámci experimentální části práce. Byly pozorovány menší změny objemu vzorků oceli při vyšších kalících teplotách než u nižších.

Klíčová slova

Nástrojová ocel, martenzit, kalení, deformace, pnutí, vakuová pec

Abstract

In this thesis, the deformation stages, which take place in tool steels after quenching in vacuum furnaces, were studied. This study was focused on the heating and cooling conditions during this type of quenching. In the experimental part, the deformation changes in particular samples made of tool steel after vacuum quenching were analyzed. Minor changes in the volume of samples at higher quenching temperatures compared to lower temperatures were observed.

Key words

Tool steel, martensite, quenching, deformation, stress, vacuum furnace

Bibliografická citace mé práce:

ABU KHAIT, Y. *Deformace nástrojových ocelí po kalení ve vakuových pecích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. **28** s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Deformace nástrojových ocelí po kalení ve vakuových pecích* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Yosef Abu Khait

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat doc. Ing. Bohumilovi Pacalovi, CSc. za odborné vedení, ochotu a cenné rady při zpracovávání bakalářské práce. Také bych rád poděkoval Ing. Evženovi Vyplašilovi, CSc. za možnost provedení experimentální části bakalářské práce ve společnosti SCHMOLZ + BICKENBACH s.r.o. v Hustopečích u Brna. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině za podporu při mém studiu.

Obsah

Úvod.....	10
1. Rozdělení nástrojových ocelí.....	11
1.1 Nástrojové oceli.....	11
1.2 Rozdělení nástrojových ocelí podle chemického složení.....	11
1.3 Rozdělení nástrojových ocelí podle použití.....	12
1.4 Rozdělení nástrojových ocelí podle postupu tepelného zpracování.....	12
2. Mechanické a technologické vlastnosti nástrojových ocelí.....	14
2.1 Tvrdost.....	14
2.2 Pevnost v ohybu.....	15
2.3 Houževnatost.....	15
2.4 Prokalitelnost.....	15
2.5 Odolnost proti popouštění (teplotní stálost).....	16
2.6 Odolnost vůči otěru a otupení.....	17
2.7 Tepelná únava.....	17
2.8 Stálost rozměrů.....	17
3. Martenzitické kalení.....	18
3.1 Ohřev na kalící teplotu.....	18
3.2 Kalící prostředí.....	19
3.3 Způsoby kalení.....	19
4. Specifika tepelného zpracování ve vakuových pecích.....	21
5. Deformace nástrojových ocelí po kalení.....	22
5.1 Tepelná pnutí.....	22
5.2 Strukturní pnutí.....	23
6. Experimentální část práce.....	24
Seznam použité literatury.....	28

Úvod

Nástrojová ocel je jednou z typů ocelí se specifickým využitím pro široké spektrum nástrojů od např. běžného ručního náradí až po břitvy vrtacích hlav razícího stroje. Od běžné oceli se liší chemickým složením a postupy tepelného zpracování. Nejdůležitější vlastností nástrojových ocelí je vysoká tvrdost, které je dosaženo kalením na martenzitickou strukturu.

Při kalení se využívají různá ochlazovací prostředí, například vodní či olejové lázně, vzduch a inertní plyny ve vakuu. Během procesu kalení dochází ke vzniku různých deformací v důsledku strukturních pnutí.

Bakalářská práce řeší problematiku deformačních pochodů, které probíhají v nástrojových ocelích při martenzitickém kalení se zaměřením na podmínky ohřevu a ochlazování ve vakuových pecích. Součástí této bakalářské práce je i experimentální část, ve které budou analyzovány deformační změny u konkrétní součásti vyrobené z nástrojové oceli po kalení ve vakuové peci.

1. Rozdělení nástrojových ocelí

1.1 Nástrojové oceli

Nástrojové oceli jsou vhodné materiály pro výrobu nástrojů. Požadavky na nástrojové oceli se liší v závislosti na způsobu práce a druhu nástroje, všeobecně se však vyžaduje vysoká pevnost, tvrdost, odolnost proti opotřebení, vhodná odolnost proti korozi, houževnatost a případně rozměrová stálost. Vhodné kombinace vlastností je dosaženo použitím optimálního chemického složení materiálu a vhodné technologie jeho výroby [1,2]. V zásadě nástrojové oceli rozdělujeme na nelegované a legované (viz tab. 1.2). Zvláštní skupinu nástrojových ocelí tvoří oceli rychlořezné. Dělí se na nízkouhlíkové, středněuhlíkové a vysocelegované oceli a jsou specifikovány v ČSN EN normě a v ČSN normě (v třídě 19).

Kritéria rozdělení nástrojových ocelí podle:

- 1) chemického složení
- 2) způsobu použití
- 3) postupu tepelného zpracování

1.2 Rozdělení nástrojových ocelí podle chemického složení

Tab. 1.2 Rozdělení nástrojových ocelí dle normy ČSN EN a ČSN [3].

Podle ČSN EN-10027-1	Podle ČSN 42002
Nástrojové oceli nelegované	Nástrojové oceli nelegované
C35U (19065)	Nízkouhlíkové (0,3 – 0,6 % C)
C105U (19191)	Středněuhlíkové (0,5 – 1,1 % C)
C125U (19255)	Vysokouhlíkové (1,0 – 1,5 % C)
Nástrojové oceli legované	Nástrojové oceli legované
90MnV8 (19312)	Nízkolegované (do 5% legur)
35CrMo8 (19520)	Střednělegované (5 – 10% legur)
X210Cr12 (19436)	Vysokolegované (nad 10% legur)
Rychlořezné oceli	Rychlořezné oceli
HS 3-2-2 (19820)	Oceli pro běžné použití
HS 6-5-2 (19830)	Výkonné oceli
HS 10-5-3-10 (19861)	Vysoce výkonné oceli (+ Co)

Nástrojové oceli obsahují uhlík v množství od 0,3 do cca 1,5% a další prvky:

a) doprovodné prvky prospěšné: Mn, Si, Al a nečistoty jako P, S, O, N, H:

- Mangan se používá k dezoxidaci a k vázání síry, tvoří nestálé karbidy a zvyšuje prokalitelnost.
- Křemík se používá jako dezoxidovadlo, mírně zvyšuje prokalitelnost a zlepšuje mez únavy a mez pružnosti.
- Hliník se používá jako dezoxidovadlo, slučuje se i s dusíkem.
- Fosfor tvoří tvrdé fosfidy, zvyšuje tvrdost a prokalitelnost, zlepšuje obrobitelnost, ale zhoršuje plastické vlastnosti a houževnatost za studena, a proto u nástrojových ocelí jeho obsah nepřekračuje hranici 0,03%.
- Síra, u většiny ocelí je žádoucí co nejnížší obsah síry s výjimkou případů, kdy se pomocí vyšších obsahů síry zlepšuje obrobitelnost. Obsah síry je u nástrojových ocelí obvykle nižší než 0,02%.
- Kyslík, vliv kyslíku vázaného ve vměstcích (oxidy, křemičitany) závisí na tvaru vměstků. Jemně vyloučené vměstky působí zjemnění struktury. Větší množství zvláště hrubších

vměstků způsobuje sklon k únavovým lomům, heterogenitu struktury po tváření, vznik prasklin při tepelném zpracování a sklon k bodové korozi.

- Dusík, běžný obsah dusíku v ocelích se pohybuje od 0,002 do 0,006%. Při vyšším obsahu vznikají bubliny, čímž snižuje pevnost.

- Vodík, rozpuštěný vodík snižuje tažnost, kontrakci a vrubovou houževnatost [1,11].

b) záměrně přidané prvky - legující prvky zejména: Cr, Mn, Ni, W, Mo, V a výjimečně i Co:

- Chrom zvyšuje prokalitelnost ocelí a v struktuře se vyskytuje ve formě karbidů.

- Mangan v oceli zvyšuje pevnost, tvrdost, houževnatost a prokalitelnost.

- Nikl zvyšuje pevnost, houževnatost a prokalitelnost ocelí.

- Wolfram zvyšuje prokalitelnost ocelí, při vyšším obsahu snižuje houževnatost.

- Molybden má stejný účinek jako wolfram. Navíc nástrojové oceli obsahující molybden mají vyšší houževnatost.

- Vanad zvyšuje prokalitelnost ocelí, odolnost proti popuštění i proti otěru a tvoří speciální karbidy.

- Kobalt zvyšuje odolnost proti popuštění a náchylnost k oduhličení ocelí a snižuje prokalitelnost ocelí.

1.3 Rozdělení nástrojových ocelí podle použití dle (ČSN 42 0075) [2]:

NA – na řezné nástroje

NB – na nástroje pro stříhání

NC – na nástroje pro tváření (NCS – za studena, NCT – za tepla)

ND – na formy

NE – na nástroje pro drcení a mletí

NF – na ruční nástroje a nářadí

NG – na měřidla

NH – na upínací nářadí

1.4 Rozdělení nástrojových ocelí podle postupu tepelného zpracování

Žihání

Žihání je způsob tepelného zpracování, kdy je materiál zahřát na žíhací teplotu, udržován na ní relativně dlouhou dobu a poté pomalu ochlazen na vzduchu či v dalším ochlazovacím médiu. Existuje několik druhů žihání. Žihání naměkko produkuje ocel s nízkou tvrdostí, tvařitelností za studena a dobrou obrobiteľností. Žihání ke snížení pnutí je prováděno při teplotách od 600°C do 650°C po jednu hodinu a následným pomalým ochlazením na vzduchu. Jak již název napovídá, jeho účelem je snížit vnitřní pnutí. Posledním druhem žihání je normalizační. Jeho účelem je zjemnění hrubého zrna či homogenizování struktury oceli. Výsledkem je jemnější a rovnoměrné zrna.

Kalení

Jedním ze základních druhů tepelného zpracování je kalení, což je proces, při kterém dochází k rychlému ochlazení oceli zahřáté na kalící teplotu za účelem zvýšení tvrdosti a pevnosti. Kalitelnost se dá označit jako schopnost oceli dosáhnout nerovnovážného strukturního stavu v důsledku kalení. Kalení se rozděluje na martenzitické a bainitické. Vyžadované vlastnosti nástrojových ocelí poskytuje především martenzitické kalení.

Kalení a nízkoteplotní popouštění na primární tvrdost

Cílem nízkoteplotního popouštění (do 200°C) je přeměna tetragonálního martenzitu a zbytkového austenitu na martenzit kubický. Důsledkem této přeměny je vzrůst měrného objemu a hlavně zmenšení vnitřního pnutí. Konečná tvrdost oceli po popouštění na primární tvrdost je přímo závislá na tvrdosti kubického martenzitu.

Kalení a vysokoteplotní popouštění na sekundární tvrdost

Zvýšení tvrdost oceli po popouštění na sekundární tvrdost je dosaženo zahřáním oceli na teploty 550°C až 600°C, jehož důsledkem je precipitací dispergovaných karbidů wolframu, vanadu a molybdenu (W_2C , V_4C_3 , Mo_2C) a následným ochlazením, při němž dochází k transformaci zbytkového austenitu na martenzit.

Dalšími způsoby, při kterých se využívá tepelných procesů, jsou povrchové úpravy nástrojových ocelí, jako jsou povlakování, boridování, nitridování a difúzní chromování.

2. Mechanické a technologické vlastnosti nástrojových ocelí

U nástrojových ocelí s ohledem na účel použití, rozměry nástrojů a pracovní podmínky je nezbytné garantovat následující vlastnosti.

Mechanické vlastnosti:

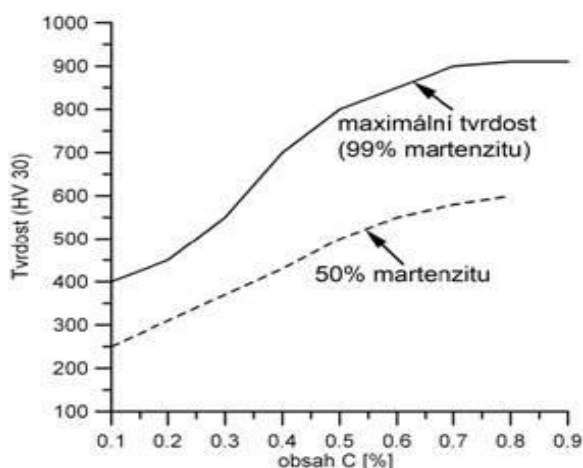
- tvrdost
- pevnost v ohybu
- houževnatost

Technologické vlastnosti:

- prokalitelnost
- odolnost proti popouštění (teplotní stálost)
- odolnost vůči otěru a otupení
- odolnost proti tepelné únavě
- stálost rozměrů

2.1 Tvrdost

Tvrdost je důležitou vlastností nástrojových ocelí vzhledem k tomu, že podstatně ovlivňuje odolnost proti opotřebení a také řezivost. Při nízké tvrdosti dochází k poklesu meze kluzu. Tvrdost nástrojů po martenzickém kalení roste v závislosti na zvyšujícím se obsahu uhlíku (viz obr. 2.1).



Obr. 2.1: Závislost tvrdosti oceli s 50 a 99,9% martenzitu na obsahu uhlíku [3].

Tvrdost oceli ovlivňují také legující přísady, a to hlavně v případě, když dochází k tvorbě karbidů (viz tab. 2.1). Nejčastěji se používají karbidy chromu, molybdenu, vanadu a wolframu [2,5,6].

Tab. 2.1 Karbidy v nástrojových ocelích [3].

Karbidy	Tvrdość[HV]	Prvky (M)	Poznámky
M_3C	asi 950	Fe, Mn	Karbid cementitického typu, je relativně měkký
$M_{23}C_6$	1000-1100	Cr	Při ohřevu na kalící teplotu se zcela rozpustí, chrom přechází do tuhého roztoku a zvyšuje prokalitelnost oceli
M_6C	1200-1300	W	Při ohřevu na kalící teplotu se zčásti rozpustí v austenitu, zčásti zůstává zachován a omezuje růst zrna austenitu.
M_2C	1700-1900	W, Mo	Precipitují ve struktuře při popouštění 500°C - 600°C
MC (M_4C_3)	2200-3000	V	Jemné velmi tvrdé karbidy, které se při austenitizaci jen zčásti rozpustí a zabraňují zhrubnutí austenitického zrna. Dále precipitují ve struktuře při popouštění 500°C - 600°C

2.2 Pevnost v ohybu

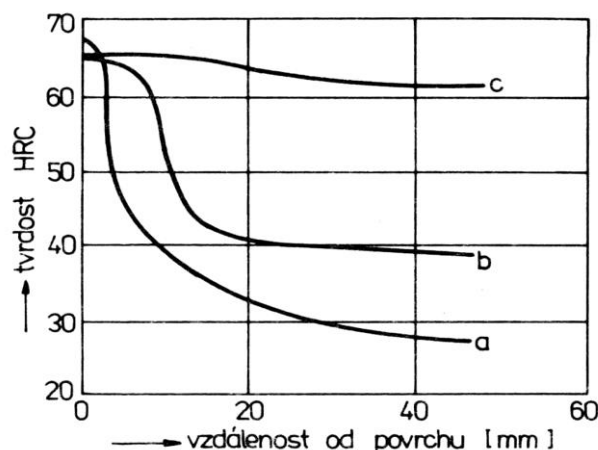
Nástrojové oceli jsou vystaveny především namáháním ohybem, a proto je nezbytné, aby měly vysokou pevnost v ohybu. Ta závisí podobně jako tvrdost na obsahu uhlíku v oceli (čím vyšší obsah uhlíku, tím vyšší mez pevnosti v ohybu) a na způsobu tepelného zpracování. Dalším faktorem ovlivňujícím pevnost v ohybu je stav povrchu daného nástroje, jelikož vysoce pevné materiály jsou náchylné na vruby.

2.3 Houževnatost

Houževnatost vyžadují většinou nástroje pro tváření za studena i za tepla, namáhané často kombinovanými silami v tahu, tlaku, ohybu, krutu a dynamickými rázy. Volí se proto i menší tvrdost na úkor potřebné houževnatosti. Houževnatá ocel má jemnozrnnou strukturu získanou správným postupem tepelného zpracování a musí být prosta vnitřních nečistot, trhlinek a vnitřního pnutí. Karbidická řádkovitost snižuje houževnatost oceli v příčném směru. Způsobuje také problémy při tepelném zpracování kvůli tomu, že při austenitizaci zvyšuje heterogenitu rozložení uhlíku a legujících prvků v oceli [1].

2.4 Prokalitelnost

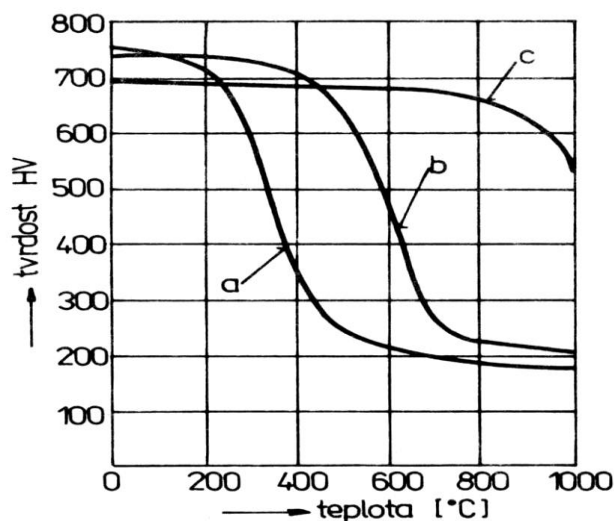
Závisí na chemickém složení oceli a na velikosti nástroje. Dobrá prokalitelnost je nutná u nástrojů, které kromě povrchu musí být tepelně zpracovány i do hloubky průřezu, např. u zápustek, forem pro tlakové lití apod. U uhlíkových ocelí je prokalitelnost malá a zvyšuje se přidávkem manganu, niklu a chromu (viz obr. 2.4) [1].



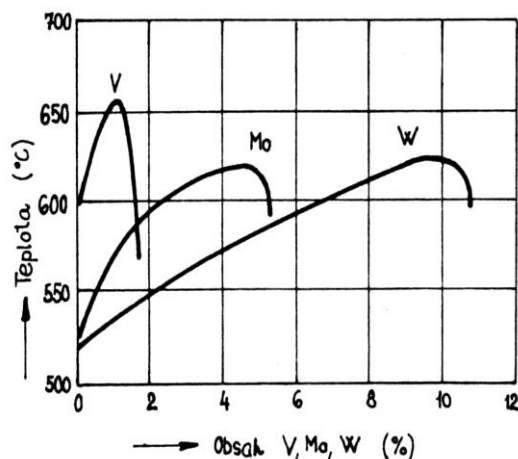
Obr. 2.4 : Křivky prokalitelnosti nástrojových ocelí:
 a- C105U (19 191) b- 90MnCrV8 (19 313) c- 90MnCrV8 (19 313) [3].

2.5 Odolnost proti popouštění (teplotní stálost)

Stálost mechanických vlastností a tvrdosti je podstatná u nástrojových ocelí, jejichž struktura při provozu bude teplotně ovlivněna. Jedná se o zachování odolnosti proti otěru a u řezných nástrojů i řezivosti, což je důležité pro prodloužení životnosti nástrojů. Toho je dosaženo výběrem vhodného typu ocele (viz obr. 2.5.1). U legovaných ocelí se jako přísady nejčastěji používají wolfram, molybden, vanad a kobalt kvůli tomu, že mají nejsilnější vliv na odolnost proti popouštění (viz obr. 2.5.2).



Obr. 2.5.1: Tvrdost nástrojových materiálů v závislosti na teplotě:
 a- nelegovaná ocel b- rychlořezná ocel c- slinutý karbid [3].



Obr. 2.5.2: Vliv V, Mo a W na odolnost proti popouštění u nástrojových ocelí [3].

2.6 Odolnost vůči otěru a otupení

Otěr je zodpovědný za míru opotřebení nástrojů a tím *de facto* i otupení. Odolnost vůči těmto typům opotřebení je významně ovlivněna obsahem uhlíku v matici a dále velikostí, typem a množstvím karbidů v nástrojové oceli.

2.7 Tepelná únava

Při tomto jevu dochází k opotřebování materiálů kvůli tvorbě povrchových trhlinek, v důsledku čehož může dojít i k prasknutí. Je to způsobeno střídavým ohříváním a zchlazováním povrchových vrstev materiálu, např. povrchových vrstev nástroje, jež jsou v kontaktu s přehřátým polotovarem. Při zahřívání povrchová vrstva expanduje, avšak studené podpovrchové vrstvy tomuto jevu brání. V důsledku tohoto dochází ke vzniku povrchového tlakového pnutí, jehož velikost je přímo závislá na hodnotě rozdílu teplot a koeficientu tepelné roztažnosti. Při ochlazování dochází ke změně tahového pnutí. Plastická deformace probíhá v povrchové vrstvě, pokud je vzniklé napětí větší než mez kluzu, a zároveň se snižuje pnutí a dochází ke změně rozměrů nástroje.

2.8 Stálost rozměrů

Rozměrová stálost nástrojů je velmi žádaná vzhledem k tomu, že nutnost obrousování zvyšuje cenu. Tepelné a strukturální pnutí způsobuje změny rozměrů a tvarů. Obecně lze říci, že kalení způsobuje zvětšení rozměrů nástrojů. Při popouštění může docházet ke zmenšování rozměrů ale i k jejich zachování.

Tvarové deformace a změny rozměrů lze částečně eliminovat plynulejším ohřevem na kalící teploty či použitím mírnějšího prostředí, například vzduch nebo teplá lázeň, případně chlazením během lisování.

3. Martenzitické kalení

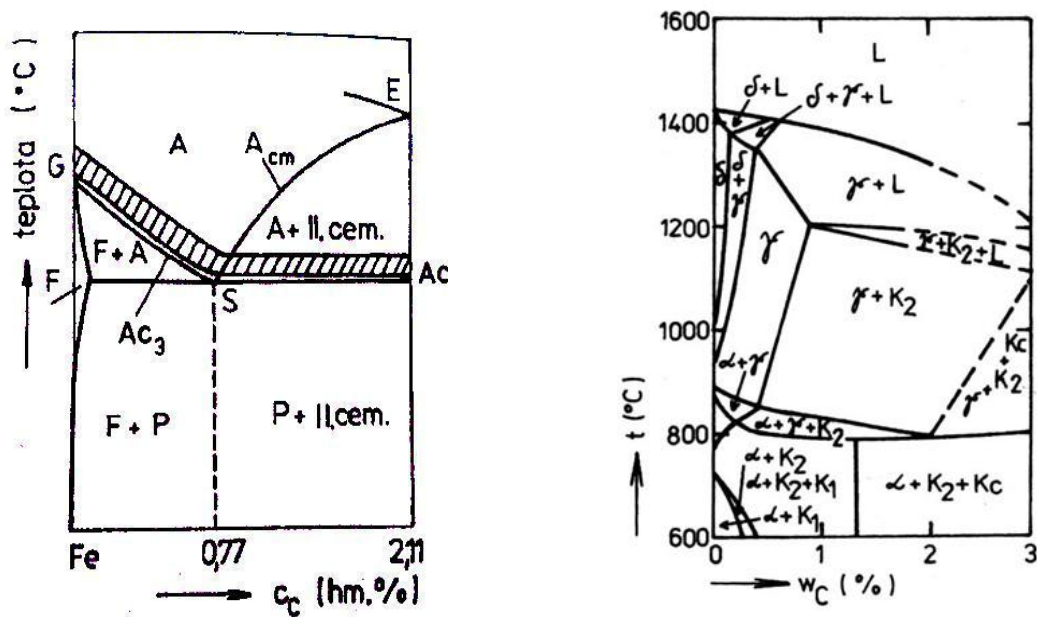
Martenzit vzniká rychlým ochlazením austenitu pod teplotu M_s (u uhlíkových ocelí v rozmezí 200°C až 300°C) v důsledku čehož je difúze substitučních a intersticiálních prvků eliminována a austenit je transformován bezdifúzně, nicméně přeměna není dokonalá a ve struktuře oceli vždy zůstává určité procento zbytkového austenitu. Martenzit má tetragonální prostorovou mřížku. Základní buňkou je pravoúhlý hranol s parametrem výšky c a základny a , v němž jsou atomy železa středěny prostorově (BCT), kdežto atomy uhlíku intersticiálně. Poměr parametrů c/a je závislý na obsahu uhlíku oceli, čím větší poměr, tím větší obsah uhlíku, se označuje jako tetragonalita [8].

3.1 Ohřev na kalící teplotu

K ohřevu na kalící teplotu by mělo docházet rovnoměrně a pozvolně. Prudký ohřev by mohl způsobit deformaci tvaru či vznik trhlin. Zejména ocele s horší tepelnou vodivostí jsou náchylná k výše zmíněným problémům a z tohoto důvodu je kalící teploty dosaženo stupňovitým ohříváním. Výška kalící teploty je specifická pro každou ocel a závisí na jejím chemickém složení (viz obr. 3.1).

Podeutektoidní oceli se kalí z teplot 30°C ÷ 50°C nad teplotou způsobující přechod austenitu na ferit označenou bodem Ac_3 v obrázku 3.1 (Fe-Fe₃C). Nadeutektoidní oceli mají kalící teplotu 30°C ÷ 50°C nad teplotou, při které dochází k přeměně austenitu na sekundární cementit znázorněnou bodem $Ac_{1,2}$. Doba potřebná pro ohřátí materiálu na kalící teplotu se odvíjí od průřezu materiálu, prostředí, ve kterém je nástroj ohříván, a od výšky předeřívací a kalící teploty. Správná doba ohřevu se určí s pomocí diagramů nebo tabulek definujících doby ohřevu v závislosti na průřezu ohřívajícího materiálu.

Udržování kalící teploty by mělo trvat pouze po dobu potřebnou pro stejnoměrné prohřátí celého objemu kaleného materiálu. Při příliš dlouhém ohřívání by mohlo dojít k nežádoucí strukturní změně jako je zhrubnutí austenitického zrna [5].



Obr. 3.1: Pásmo kalících teplot v diagramu Fe-Fe₃C a Fe-Cr-C (12% Cr) [3,4].

3.2 Kalící prostředí

Kalící prostředí volíme podle chemického složení kalené oceli a její polohy v ARA diagramu. K snížení vnitřního pnutí vznikajícího při kalení se používá kalící prostředí s menší ochlazovací intenzitou.

Ochlazovací účinnost je závislá na tepelné vodivosti, viskozitě kalícího prostředí a na měrném a výparném teple. Pokud dochází při kalení k odparu kalícího média (např. vody, oleje), pak je nutno tvořící se „parní polštář“ rozrušit pohybem ať už kalného předmětu nebo chladícího média. Ochlazovací účinnost je také ovlivněna velikostí měrného povrchu předmětu a jeho čistotou.

Nejběžněji používaným kalícím médiem je voda a kalící olej. Voda je výhodná díky tomu, že je levná, nehořlavá a má vysokou ochlazovací účinnost, kterou lze ještě zvýšit přidávkem solí (NaCl, NaNO₃ nebo KNO₃) či hydroxidů (NaOH) nebo kyselin (H₂SO₄). Ochlazovací účinnost vody lze regulovat přidávkem rozpustných polymerů (např. polyalkylenglykol a polyakryláty). Tyto přísady zpomalují ochlazovací účinek vody a tím eliminují možnost vzniku různých strukturních defektů, jako jsou například trhliny či deformace kalného materiálu. Oleje mají oproti vodě tři až čtyřikrát menší ochlazovací rychlost v perlitické oblasti a v martenzitické oblasti je až desetkrát nižší. Olejem se kalí především legované oceli z důvodu eliminace vzniku vnitřního pnutí. Nejčastěji se používají minerální oleje s různými aditivy. Jako další kalící médium se používá vzduch za běžného tlaku nebo plyny za vyšších tlaků (např. dusík, helium či argon). Chlazení vzduchem je postupné a používá se ke kalení vysokolegovaných ocelí [6,7].

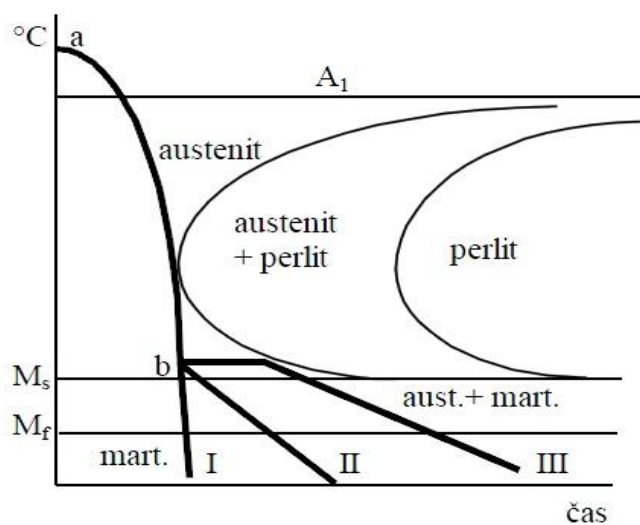
3.3 Způsoby kalení

Jsou známý dva druhy martenzitického kalení. Rozdělují se podle průběhu ochlazování na nepřetržitě (přímé) a přetržitě, které se dále dělí na kalení lomené, kalení termální a kalení se zmrazování (známé též jako kryogenní kalení) [6].

Nepřetržité kalení, reprezentované v diagramu anizotermického rozpadu austenitu (ARA) čarou I (viz obr. 3.3), je prováděno prudkým ochlazením v jediném prostředí (nejčastěji ve vodě) z bodu a přes teploty M_s a M_f , v důsledku čehož dochází ke vzniku velkého vnitřního pnutí. Tento typ kalení je používán pro výrobu jednoduchých součástek, a pokud jsou požadavky na výsledek kalení nízké.

Lomené kalení, které je znázorněno na čarou II (viz obr. 3.3), je charakterizováno prudkým ochlazením z bodu a do bodu b aby nedošlo ke vzniku perlitu. Následně se kalený předmět vyjme z primárního prostředí a vloží do sekundárního prostředí s nižší chladicí schopností (např. do oleje). Vzhledem k tomu, že přechod přes teploty M_s a M_f je pozvolnější, dochází ke snížení vznikajícího napětí.

Termální kalení, označené na diagramu ARA čarou III (viz obr. 3.3) má v první fázi stejný průběh jako předchozí typy kalení. Při ochlazení na teplotu reprezentovanou bodem b se daný předmět vloží do prostředí, které je temperováno na teplotu o hodnotě vyšší, než má bod M_s (např. lázeň s roztavenou solí). Kalený předmět je zde ponechán na určitou dobu za účelem částečného vyrovnání teplot uvnitř a na jeho povrchu. Předmět je vyjmut z lázně těsně před okamžikem, kdyby došlo k přeměně austenitu na bainit, a je ochlazen pod teplotu martenzitické přeměny (např. vzduchem). Výhodou tohoto složitějšího postupu je, že omezuje nebezpečí vzniku vnitřního pnutí a proto se používá při výrobě nástrojů.



Obr. 3.3: Způsoby kalení - ARA Diagram [3].

Kalení se zmrazováním je používáno u ocelí, které mají teplotu ukončení martenzitické přeměny (M_f) pod 0°C . Při kalení do běžných kapalin (voda či kalící olej) by došlo k nežádoucímu ohřevu kalených předmětů kvůli nedostatečnému chladicímu potenciálu daných kapalin. Důsledkem by bylo velké množství zbytkového austenitu v struktuře kaleného předmětu. Pokud je požadavek na co nejnížší obsah zbytkového austenitu v kaleném předmětu je nutné chladit za teplot nižších než je teplota M_f , která je povětšinou pod bodem mrazu. Chladí se tedy nejprve ve vodní lázni a potom se kalený předmět přesune do zmrazovací lázně (obsahující např. líc a tuhý oxid uhličitý nebo tekutý dusík).

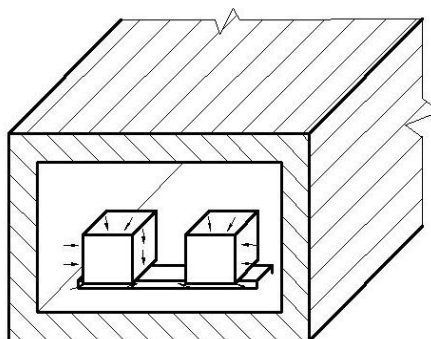
4. Specifika tepelného zpracování ve vakuových pecích

Vakuové pece bývají konstruovány pro více technologických procesů jako například pro odplyňování, pájení, žíhání a kalení ve vakuu nebo atmosféře inertních plynů. Jako topné jednotky se využívá nejčastěji grafitové tyče.

Výhodou kalení ve vakuových pecích je, že v nich nedochází k oduhličení, nenastává oxidace zpracovávaných dílů, dochází k malým deformacím a součásti mají lesklý povrch. Vakuové pece jsou ekologicky velmi přijatelné zařízení, jelikož při jejich provozu nevznikají prakticky žádné odpady. Celý proces tepelného zpracování se kontroluje vsázkovými termočlánky a výroba je z větší části automatizovaná.

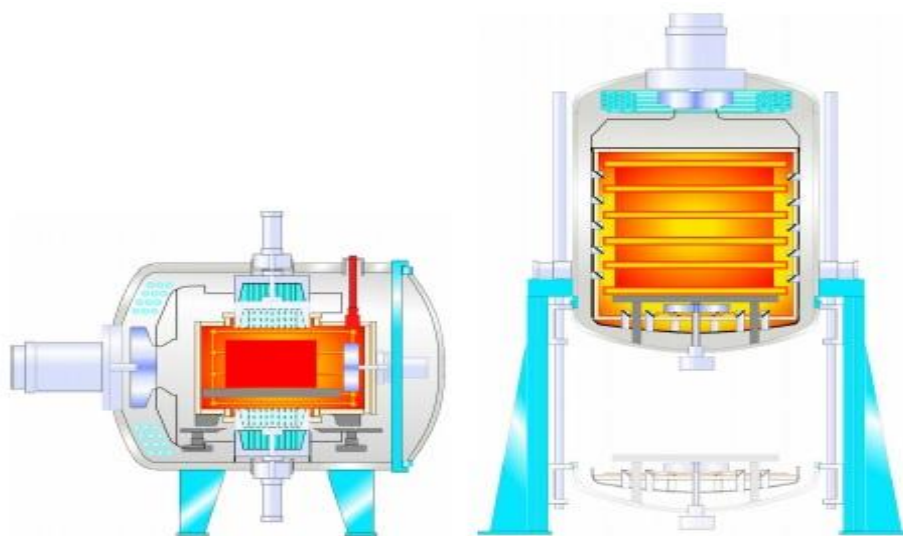
Nevýhodou kalení ve vakuových pecích je delší ohřev na austenitizační teploty vzhledem k tomu, že přenos tepla ve vakuu je možný pouze sáláním.

Na rozdíl od konvenčních pecí je při kalení ve vakuu nutno brát v úvahu proudění chladicího média vzhledem k poloze nástroje v peci (viz obr. 4.1). Nástroje se výjimečně oddělují keramickými destičkami, aby při kalení nedošlo k jejich svaření.



Obr. 4.1: Vhodné uložení součástek do vakuové pece [12].

Nejpoužívanější vakuové pece jsou pece s kalící lázní. Komory jsou od sebe odděleny buď vakuově těsnou přepážkou, nebo tepelně izolační klapkou. Pece mohou být horizontální, vertikální nebo zvonové (viz obr. 4.2).



Obr. 4.2: Horizontální a vertikální vakuové pece [9].

5. Deformace nástrojových ocelí po kalení

Během tepelného zpracování ocelí dochází k nežádoucím deformacím tvarů a rozměrů opracovávaných nástrojů. Dochází k nim v důsledku vnitřního pnutí, které vzniká na povrchu a v jádře tepelně zpracované součástky během ohřevu a ochlazování. Míra deformace přímo závisí na tepelném a strukturním pnutí. Tepelná pnutí jsou způsobena rychlým ohřevem a ochlazením kaleného objektu, kdežto strukturní pnutí jsou důsledkem vzniku daných struktur při rychlém ochlazení. Objemové deformace způsobené vnitřním pnutím lze rozdělit podle velikosti na makroskopické, mikroskopické a submikroskopické.

5.1 Tepelná pnutí

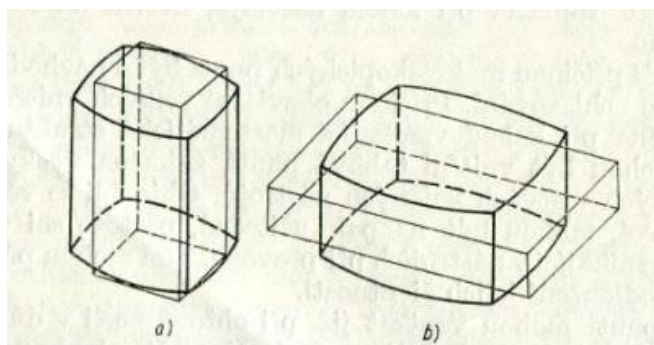
Ke vzniku vnitřního pnutí dochází již při ohřevu oceli v důsledku její tepelné roztažnosti. Vnitřní pnutí se zvyšuje s rostoucím průřezem zahřívajícího nástroje a rychlostí ohřevu. Je nepřímo závislé na tepelné vodivosti kalené oceli, roste s klesající hodnotou tepelné vodivosti. Tepelná vodivost se u legovaných nástrojových ocelí zhoršuje s narůstajícím počtem legujících prvků. Vnitřní pnutí při ohřevu vzniká, když se teplejší povrchové vrstvy prodlužují a zvětšuje se jejich objem, zatímco studenější střed se však tomu brání. V důsledku toho vznikají v jádře ohřívajícího nástroje nejprve napětí tahová, kdežto v povrchových vrstvách napětí tlaková. Trvalé deformace při ohřevu kalené oceli vznikají, pokud je překročena její mez pružnosti.

Při ochlazování ohřátých nástrojů dochází ke vzniku vnitřního pnutí z totožných důvodů jako při ohřevu. Navíc je vnitřní pnutí při ochlazování ohřátých nástrojů za stejných teplotních podmínek ovlivněno jejich tvarem. Čím složitější je tvar nástroje, tím větší bude vnitřní pnutí.

Při ochlazování ohřátého nástroje dochází nejdříve k smršťování jeho povrchu v důsledku jeho rychlejšího ochlazování než u jádra. V povrchových vrstvách vzniká tahové napětí, kdežto v jádře vzniká především tlakové napětí.

Následné ochlazování způsobuje smršťování jádra, zatímco povrch se dalšímu smršťování brání, což způsobuje změnu povahy vnitřního napětí. Během fáze v níž v jádře chlazeného objektu panuje tlakové napětí, dochází především u objemnějších nástrojů k smršťování otvorů.

Deformace ocelových polotovarů tyčovitěho a deskovitěho tvaru způsobené vnitřním pnutím vzniklým při jejich ohřevu a ochlazování můžeme pozorovat na obrázku 5.1a a 5.1b respektive.



Obr. 5.1: Deformace ocelových polotovarů vlivem pnutí [12].
a) tyčovitěho tvaru, b) deskovitěho tvaru

5.2 Strukturní pnutí

Při kalení nástrojů vzniká velké vnitřní pnutí v důsledku strukturních přeměn austenitu na martenzit případně bainit, přičemž dochází ke změnám objemu kaleného nástroje. Martenzitická struktura se nejprve vytvoří na povrchu kaleného objektu a zároveň dojde ke zvětšení jeho objemu. Ve stejné době se jádro objektu strukturně skládá ještě z austenitu (BCC), který je tak stlačován expandujícím martenzitem povrchových vrstev, jenž tak brání přeměně zbytkového austenitu na martenzit. Jádro se také zvětšuje v důsledku přeměny austenitu na martenzit a tlakem na povrchové vrstvy způsobuje jejich roztahování.

Strukturní pnutí také souvisí se vznikem struktury BCT a obsahem uhlíku v kalené nástrojové oceli (viz kapitola 3). Například jehlicový martenzit (tzv. dislokační) má v důsledku nižšího obsahu uhlíku menší objemové změny a nižší strukturní pnutí, kdežto deskovitý martenzit (tzv. dvojčatový) má naopak vyšší obsah uhlíku, což způsobuje větší změny objemu a vyšší strukturní pnutí.

Mimo jednotlivé působení tepelného a strukturního pnutí na nástrojové oceli po kalení je nutno vzít v potaz souhrn působení obou pnutí naráz, jež může vést ke vzniku deformací i v případě, že u jednotlivého působení byl kalený objekt v rámci mezí tolerance. Minimální míry deformace u kalených objektů lze dosáhnout, pokud se v důsledku použití optimální kombinace uhlíku s legujícími prvky podaří v zakalené oceli vyrušit vzniklé tlakové a tahové napětí. Tento typ oceli se nazývá bezdeformační.

6. Experimentální část práce

Součástí této bakalářské práce je analýza deformačních pochodů, které probíhají v nástrojových ocelích po kalení a popouštění. Za účelem získání těchto poznatků bylo provedeno kalení a popouštění ve vakuu. Na experimentálních vzorcích byly měřeny jejich rozměry před a po kalení a popouštění mikrometrem.

Jako experimentální materiál byly použity nástrojové oceli A - 1.2343 (X37CrMoV5-1) a B - 1.2367 (X38CrMoV5-3) podle DIN norem (viz tab. 6.1) poskytnuté firmou SCHMOLZ + BICKENBACH s.r.o. Nástrojová ocel A má vysokou pevnost a houževnatost za tepla. Je odolná vůči tvorbě trhlin za tepla, může být kalena do vody za určitých podmínek a má dobrou tepelnou vodivost. Ocel označená jako B má dobrou pevnost v tahu za vysokých teplot a odolnost proti popouštění, vysokou kalitelnost a malé tendence k deformacím.

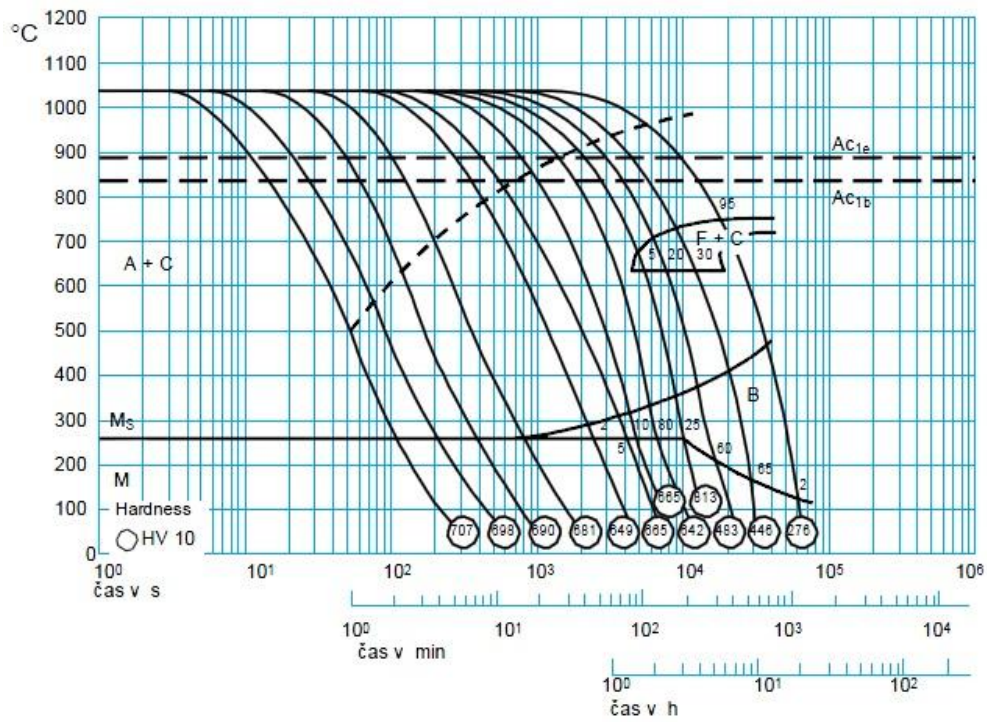
Tab. 6.1: Chemické složení vzorků v procentech.

Označení vzorků	Jakost	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
A – 1.2343	X37CrMoV5-1	0,33-0,4	0,25-0,5	0,25-0,5	Max. 0,03	Max. 0,02	4,8-5,5	1,1-1,5	0,3-0,5
B – 1.2367	X38CrMoV5-3	0,35-0,4	0,3-0,5	0,3-0,5	Max. 0,03	Max. 0,02	4,8-5,2	2,7-3,2	0,4-0,7

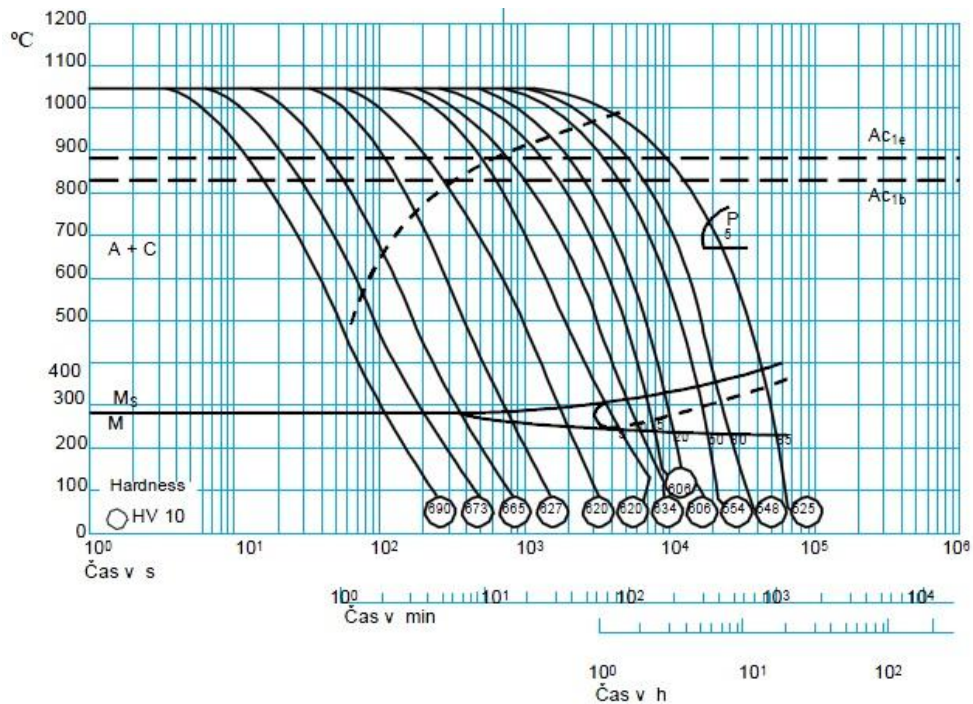
Tab. 6.2: Experimentální podmínky:

Označení vzorků	Kalící teploty podle ARA diagramů (°C)	Kalící teploty při experimentu (°C)	Popouštěcí teploty při experimentu (°C)
A – 1	1000 - 1030	1020 ±10	570
A – 2		1195 ±10	550
B – 3	1030 - 1080	1060 ±10	560
B – 4		1195 ±10	550

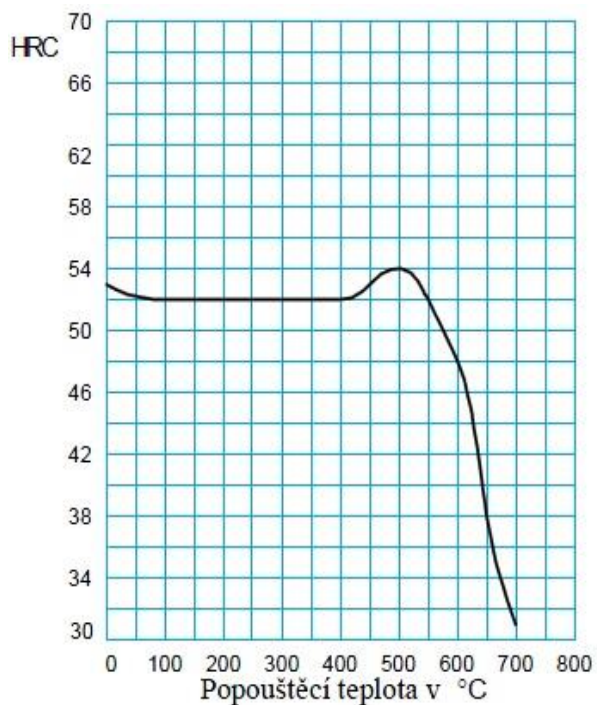
Podmínky kalení byly stanoveny na základě ARA diagramu (viz obr. 6.1 a 6.2 a tab. 6.2) a výdrž na kalící teplotu byla 20 minut. Podmínky popouštění byly vybrány na základě popouštěcího diagramu (viz obr. 6.3 a 6.4 a tab. 6.2) a výdrž na popouštěcí teplotu byla 1 hodina.



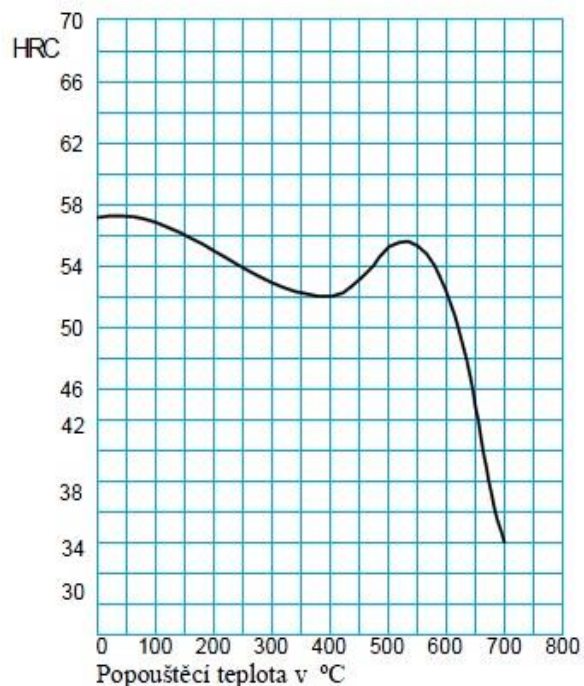
Obr. 6.1: ARA diagram pro nástrojovou ocel 1.2343 (X37CrMoV5-1).



Obr. 6.2: ARA diagram pro nástrojovou ocel 1.2367 (X38CrMoV5-3).



Obr. 6.3: Popouštěcí diagram pro nástrojovou ocel 1.2343 (X37CrMoV5-1).



Obr. 6.4: Popouštěcí diagram pro nástrojovou ocel 1.2367 (X38CrMoV5-3).

Samotné kalení a popouštění bylo provedeno v horizontální vakuové peci SCHMETZ (viz obr. 6.5) ve firmě SCHMOLZ + BICKENBACH s.r.o. v Hustopečích u Brna. Jako chladicí médium byl použit plynný dusík pod tlakem 6 barů a doba chlazení byla 30 minut.



Obr. 6.5: Vakuová pec SCHMETZ použitá při experimentu.

Rozměry zkoumaných vzorků nástrojových ocelí byly změřeny před a po kalení a popouštění (viz tab. 6.3).

Tab. 6.3: Změřené hodnoty ve výchozím stavu a po kalení a popouštění v milimetrech.

Označení vzorků	Rozměry ve výchozím stavu			Rozměry po kalení a popouštění		
	výška	délka	šířka	výška	délka	šířka
A – 1	21,46	31,26	32,54	21,48	31,28	32,56
A – 2	21,44	30,91	32,57	21,45	30,94	32,58
B – 3	13,37	60,97	13,66	13,39	60,98	13,67
B – 4	13,44	61,17	13,54	13,45	61,19	13,55

Z tabulky 6.3 je patrné, že došlo k malému nárůstu rozměrů u všech zkoumaných vzorků. Změna objemu (viz tab. 6.4) u oceli A byla větší u vzorku A – 1 než u vzorku A - 2. U oceli B byla situace analogická, vzorek B – 3 vykazoval větší objemové změny než vzorek B – 4.

Tab 6.4: Objemové změny po kalení a popouštění.

Označení vzorků	A – 1	A – 2	B – 3	B – 4
ΔV (%)	0,21	0,17	0,23	0,18

Pozorované menší změny objemu vzorků oceli při vyšších kalících teplotách byly očekávané z důvodu výskytu většího množství zbytkového austenitu ve struktuře oceli. Zvýšený podíl zbytkového austenitu při kalení z vyšších teplot je důsledkem posunu ARA diagramu k delšímu času, který je zodpovědný za vyšší rozpustnost uhlíku a legujících prvků v austenitu.

Z provedeného experimentu je možno provést následující závěr:

Pozorované změny v rozměrech vzorků souvisí se strukturními změnami, ke kterým došlo při kalení z různých teplot. Různé druhy struktur oceli v důsledku kalení z rozdílných teplot mají odlišný vliv na změny objemu. V praxi se nicméně nesledují objemové změny ale změny tvaru ve vztahu k rozhodujícímu rozměru, zda je v rámci tolerance či nikoliv. Pokud je změna v rámci tolerance, není třeba žádných opatření. Je-li změna mimo meze tolerance, je nutné součástku narovnat.

Seznam použité literatury

- [1] FREMUNT, Přemysl. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky, 1994.
- [2] PLUHAŘ, J. a kol. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1989.
- [3] Oficiální výukové stránky Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT [online]. 2014 [cit. 2016-11-9]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/07%20-%20Nastrojove%20oceli.ppt>
- [4] Oficiální výukové stránky Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT [online]. 2014 [cit. 2016-05-7]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/06%20-%20Korozivzdorne%20a%20zaruvzdorne%20oceli.ppt>
- [5] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, c2001. ISBN 80-720-4193-2.
- [6] PLUHAŘ, J.; KORITTA, J.: *Strojírenské materiály*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1977.
- [7] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 1. vyd. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-720-4130-4.
- [8] ASKELAND, Donald R a Pradeep P FULAY. *The science and engineering of materials*. 4th ed. Pacific Grove, CA: Thomson Brooks/Cole, c2003. ISBN 05-349-5373-5
- [9] MACCHION, Olivier. *CFD in the design of gas quenching furnace*. Stockholm, Sweden, 2005. Dostupné z WWW: <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:8023/FULLTEXT01.pdf>>
- [10] ŠENBERGER, J. *Metalurgie oceli na odlitky*. Vyd. 1. V Brně: VUTIUM, c2008, 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [11] PŘIBIL, Erich. *Nástrojové oceli POLDI a jejich použití. Díl 1*. Kladno: POLDI - Spojené ocelárny, 1986, 412 s.
- [12] KORECKÝ, Jan. *Kalení oceli: pomůcka k výcviku kaličů v průmyslu : s přehledem tepelného zpracování 160 československých ocelí*. 2. vydání. Praha: Práce, 1951. Technické příručky Práce.